doi:10.13866/j.azr.2019.03.24

哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应①

刘 蕊[1,2,3]，王勇辉[1]，姜盛夏[2,3]，张瑞波[2,3]，秦 莉[2,3]，
Bulkajyr T. Mambetov[4]，Nurzhan Kelgenbayev[4]，Daniyar Dosmanbetov[4]，
Bagila Maisupova[4]，张同文[2,3]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；
3. 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；
4. 哈萨克斯坦农业部阿拉木图森林研究所，哈萨克斯坦 阿拉木图 050050）

摘 要：针对哈萨克斯坦阿尔泰山南坡西伯利亚云杉（*Picea obovata*）和西伯利亚落叶松（*Larix sibirica*）开展树轮研究，建立树轮年表，计算年平均树轮宽度值和年平均断面积生长量（*BAI*），并分析在1988年发生升温突变前后，这2个树种树轮宽度指数变化趋势，及其树木径向生长对气候因子的响应。结果表明：在升温突变前后，2个树种树轮宽度指数变化趋势一致。但是，在升温突变后，其变化趋势均由不显著增加转为显著下降。即树木径向生长减缓；升温突变后，2个树种树木径向生长对降水的响应有所减弱，而对气温的响应有所增强，并且发生了树轮指数和气候因子间相关性“正负转换”的情况。

关键词：阿尔泰山；西伯利亚云杉；西伯利亚落叶松；树轮宽度；径向生长；响应分异；哈萨克斯坦

气候变暖会对森林生产力和森林分布产生影响[1-2]，并可能改变树木生长趋势[3]。方克艳等[4]研究发现，在全球变暖的背景下，北半球中高纬度和高海拔地区树木径向生长与气候因子之间出现了不稳定的非线性关系。在阿尔卑斯亚高山区开展的研究表明，挪威云杉对气温的敏感性减弱，而对降水的响应则增强[5]。郭明明等[6]在对高、中海拔岷江冷杉的研究中发现，树木径向生长随气温升高，反而出现生长量下降的情况，这种情况被称为“分异问题”。树木年轮作为记录气候变化信息的重要代用资料之一[7-9]，树木径向生长对气候因子响应的不稳定关系，必定会影响基于树轮资料重建历史气候变化序列的准确性。因此，有必要广泛开展在气候变化背景下的“分异问题”研究，评估不同时间段树木生长对气候因子响应结果的稳定性。

阿尔泰山位于中国、俄罗斯、蒙古和哈萨克斯坦4国交界处，呈西北－东南走向，是我国乃至中亚气候变化的敏感区域，在全球气候变化研究中具有特殊地位[10]。近年来，国内外研究人员在这一区域广泛开展了树木年轮学研究[11-13]。尚华明等[14]通过对哈萨克斯坦境内阿尔泰山南坡西部上林线西伯利亚落叶松的树轮宽度分析表明，在气候变暖背景下，其径向生长对气候因子的响应没有表现出明显分异。总体来看，前期相关研究是基于较小区域、较低样本量开展的。而对于哈萨克斯坦阿尔泰山长龄针叶树种的径向生长变化特征及其对气候因子的响应还有待更加深入的分析研究。

通过西伯利亚落叶松和西伯利亚云杉树木生长－气候响应分析，研究气候变暖背景下2个树种径向生长趋势及其对气候因子响应的变化，分析其是否发生了树木生长响应分异，从而了解研究区内树木生长与气候因子关系的稳定性问题。本研究对于今后在中亚哈萨克斯坦阿尔泰山开展树轮样本采集和基于树轮资料的历史气候重建研究具有指导意义。

① **收稿日期：**2018－07－26； **修订日期：**2019－01－03
基金项目：国家自然科学基金（41605047）；上海合作组织科技伙伴计划（2017E01032）；自治区科技人才培养项目（qn2015bs025）和新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2016D03005）
作者简介：刘蕊（1995－），女，硕士研究生，自然地理学专业
通讯作者：王勇辉. E-mail:Wyhsd_3011@163.com

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于哈萨克斯坦阿尔泰山南坡。区内主要树种有西伯利亚云杉(*Picea obovata*)(以下简称云杉)、西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)(以下简称落叶松)和西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*)等。其中,云杉分布较广,多生于沟谷、多石头的区域。垂直分布于海拔1 200~2 100 m,对贫瘠的环境有一定的耐受力[13]。落叶松主要分布在阿尔泰山西南坡,垂直分布于海拔1 300~2 600 m,耐干耐寒。一般5月萌芽,6—7月为速生期,9月开始落叶进入休眠期[14]。

1.2 样本采集和年表建立

依据树木年轮学基本原理[15],于2017年8月完成了在哈萨克斯坦阿尔泰山南坡森林下限西伯利亚落叶松(LDL)和西伯利亚云杉(LDY)2个点的树轮样本采集。采样点信息见表1。2个采样点空间距离8 km,海拔接近,自然环境相似。对树轮样本进行干燥、固定、打磨、目测定年、交叉定年,并用精度为0.001 mm的MeasureJ2X系统测量轮宽后将数据传入计算机。利用COFECHA程序[16]对交叉定年结果进行质量检验,采用ARSTAN年表研制程序[17]中的负指数函数去趋势方法拟合去除树木生长趋势,研制树轮宽度年表。为更好地保留年表的低频气候信息,本文最终选用标准年表(STD)进行树木生长气候响应分析,图1为落叶松和云杉树轮宽度标准年表。

表1 树轮采样点信息及其宽度年表(STD)特征参数(公共区间为1910—2010年)

Tab.1 Information about sampling sites and statistic characteristic parameters of the tree-ring width chronologies (the same period: 1910-2010)

年表代号	LDY	LDL
树种	西伯利亚云杉	西伯利亚落叶松
经度	83°45′00.86″	83°39′09.12″
纬度	50°20′36.04″	50°18′16.18″
海拔	1 234 m	1 374 m
坡向	N	N
样本量(芯/树)	40/20	42/21
年表长度	1871—2016年	1900—2016年
平均敏感度	0.152	0.181
标准方差	0.178	0.225
一阶自相关系数	0.461	0.532
树木间相关	0.438	0.463
信噪比	11.856	16.011
样本解释总量	0.922	0.941
SSS>0.85的第1年	1921年	1938年

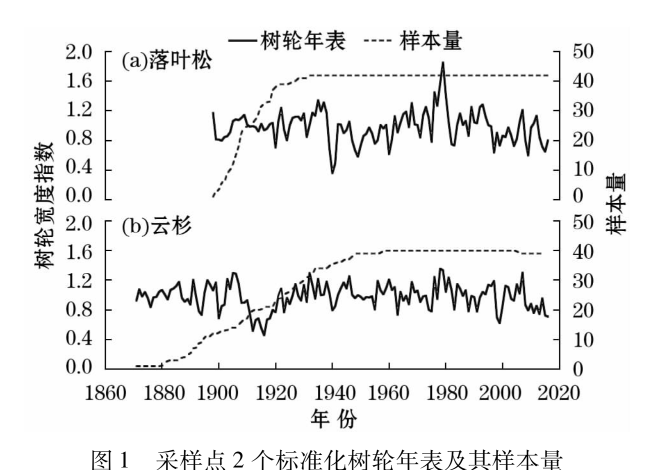


图1 采样点2个标准化树轮年表及其样本量

Fig.1 Two standardized tree-ring-width chronologies and their sample sizes

1.3 树木径向生长特征及其与气候动态响应

树木断面积生长量(*BAI*)的计算,包含了更多生物意义去量化树木生长速度和趋势的一个变量,可消除数据转换所带来的误差;同时*BAI*也能克服树轮宽度随年龄下降的生理问题[18]。其计算公式如下:

$$BAI_t = BA_t - BA_{t-1} = \pi[(R_{t-1} + TRW_t)^2 - (R_{t-1})^2]$$

式中:*BA*代表连续的横截断面积;*R*代表从髓芯到$t-1$年的树芯长度;*TRW*代表第t年的原始树轮宽度。

本文根据树轮的弓高和弦长对靠近髓芯部分缺失的树轮进行近似估计[19]。云杉有22个样芯可取到髓芯,落叶松有37个样芯可取到髓芯,以上包括估计的髓芯。利用COFECHA程序[16]对取到髓芯的落叶松和云杉样芯的交叉定年结果进行质量检验后,再利用上述公式分别计算其*BAI*值,最后采用ARSTAN年表研制程序中的负指数函数去趋势方法拟合去除树木生长趋势,得到落叶松和云杉的标准化断面积生长量年表(以下简称落叶松和云杉*BAI*年表)(图2)。为了揭示落叶松和云杉的生长过程,将取到髓芯的35根落叶松和21根云杉原始树轮宽度及*BAI*按生理年龄对齐[20],进行累加求平均得到年均树轮宽度值和年均*BAI*过程曲线(图3)。

本文使用Gleichläufigkeit指数(GLK)评估了落叶松年表和云杉年表之间的相似性[21]。对于落叶松年表x和云杉年表y,存在相邻的2 a i和$i+1$之

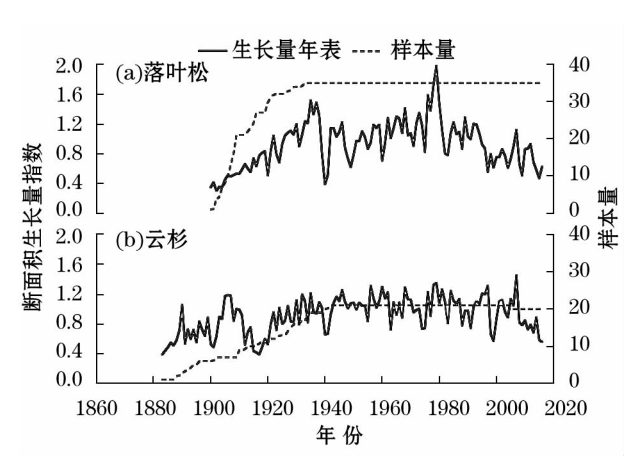


图 2　采样点 2 个标准化断面积生长量年表及其样本量

Fig. 2　Two standardized basal area increment chronologies and their sample sizes

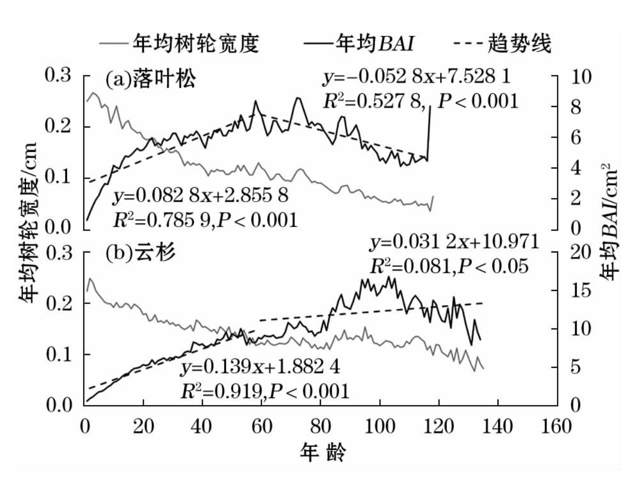


图 3　落叶松和云杉年平均树轮宽度值及年平均 *BAI*

Fig. 3　The average annual tree-ring width and *BAI* of *Larix sibirica* and *Picea sibirica*

间的变化量;此时,若 $i>0$,则定义 $G_{ix}=1/2$ 或 $G_{iy}=1/2$;若 $i=0$,则定义 $G_{ix}=0$ 或 $G_{iy}=0$;若 $i<0$,则定义 $G_{ix}=-1/2$ 或 $G_{iy}=-1/2$;那么,对于 2 条年表 x 和 y 之间则有:

$$\mathrm{GLK}(x,y)=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}|G_{ix}+G_{iy}|$$

GLK 值具有 3 个显著水平:

若 $50+\frac{1.654\times50}{\sqrt{n}}<\mathrm{GLK}<50+\frac{2.236\times50}{\sqrt{n}}$, $P<0.05$;

若 $50+\frac{2.236\times50}{\sqrt{n}}<\mathrm{GLK}<50+\frac{3.090\times50}{\sqrt{n}}$, $P<0.01$;

若 $\mathrm{GLK}>50+\frac{3.090\times50}{\sqrt{n}}$, $P<0.001$。n 为两序列公共区间长度。

u 值[22]是标准正态分布的分位数,计算公式为:

$$u=\frac{\ln\left(\frac{1+r_1}{1-r_1}\right)-\ln\left(\frac{1+r_2}{1-r_2}\right)}{2\times\sqrt{\frac{1}{n_1-3}+\frac{1}{n_2-3}}}$$

式中:r_1 和 r_2 分别代表前后 2 个时期的年表与气候因子的相关系数;n_1 和 n_2 代表 2 个年表样本容量。

本文利用 u 检验分别计算了 2 个树种在气候突变点前后 2 个时期的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与研究区上一年 5 月到今年 9 月逐月降水量和平均气温相关系数的 u 值,检验了不同时段年表与相同气候因子相关系数的差异情况。

1.4　气象资料

选用 50°~51°N,83°~84°E 范围内的 0.5°×0.5°CRU 气候格点资料 4.01[23] 作为研究区气候变化背景。所选气候要素为月降水量和月平均气温,时段为 1960—2016 年。图 4a 显示了研究区域年内逐月降水量和气温状况。研究区气温最高值出现在 7 月(16.33 ℃),而降水则呈双峰形,2 个峰值分别为 7 月(81.70 mm)和 10 月(57.16 mm)。图 4b 和图 4c 显示,研究区自 1960 年以来,年平均气温呈显著上升趋势($P<0.001$),而年降水量增加趋势则不显著($P=0.884$)。图 4d 和图 4e 显示出研究区年平均气温在 1988 年发生了由低向高的突变,而年降水量则未发生突变。

2　结果与分析

2.1　树木径向生长变化特征

从 2 个树轮宽度标准年表特征值来看(表 1),落叶松的平均敏感度、标准方差、信噪比等均略高于云杉,说明落叶松可能包含较多的气候信息[24]。2 个树种一阶自相关均较高,表明 2 个年表均包含了由气候产生的低频变化和树木生理滞后效应。2 个年表的样本解释总量都高于 0.85,表明这些样本可以代表研究区种群的总体水平,适合用于树木年轮学气候研究。

使用高低通滤波器对树轮宽度年表进行高低频信息分解[24],然后分别在其全频域、高频域、低频域做 Pearson 相关分析。结果显示,落叶松宽度年表和云杉宽度年表在全频域、高频域和低频域的相关

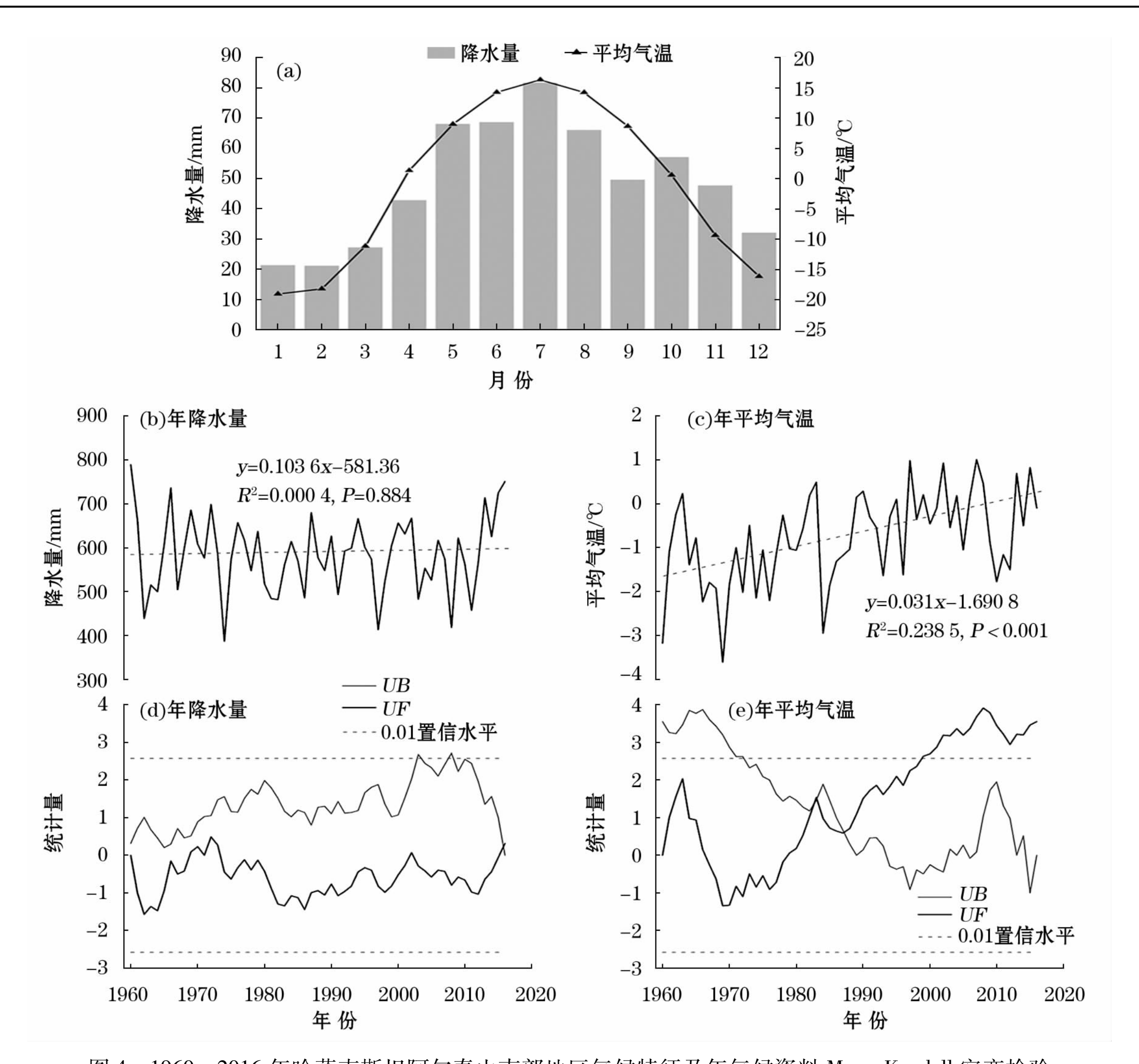


图4 1960—2016年哈萨克斯坦阿尔泰山南部地区气候特征及年气候资料Mann-Kendall突变检验

Fig. 4 Climatic characteristics and Mann-Kendall mutation test values of annual climatic data in south Altay, Kazakhstan during the period of 1960 – 2016

系数分别为0.414($P<0.01$,$n=107$)、0.532($P<0.01$,$n=107$)和0.846($P<0.01$,$n=107$),相关系数均超过99%的置信水平,说明2个年表之间存在较好的相关性,尤其是在低频域上的一致性较强,而在高频域的一致性则较弱。通过对2个树轮宽度年表的GLK值进行计算得出:GLK=0.732($n=56$,$P<0.001$)。相对较高的GLK值表明,2个树种的树木生长状况相似,树木生长的气候限制因子可能相似。此外,表2列出了落叶松与云杉2个树轮宽度年表序列在公共区间1910—2016年内的极值年份,2个年表间存在4个相同的宽度指数高值年(1935年、1976年、1978年和1979年),而没有共同的低值年。这说明这2个年表间极端低值的一致性较弱。

由图3落叶松和云杉的年平均*BAI*过程曲线可知,落叶松和云杉在幼龄林阶段(0~60 a)生长速度较快,其年平均*BAI*增加趋势达到显著性水平($P<0.001$);而在中龄林至成熟林阶段(落叶松61~117 a,云杉61~134 a),落叶松年均*BAI*趋势线呈显著下降趋势($P<0.001$),云杉年均*BAI*趋势线($P<0.05$)也出现了增加趋势减缓的现象(由于所采样芯年龄限制,本文未分析2个树种年龄大于161 a的过熟林阶段)。基于M-K检验结果(图4e),将年降水量、年平均气温和树轮宽度指数在气候突变点(1988年)前后分为2个时段1960—1988年和1989—2016年进行对比分析。图5显示了在1960—1988年和1989—2016年,研究区年降水量、年平均气温、落叶松和云杉树轮宽度指数曲线及其变化趋势线。年降水量在前一时段存在不显著的减少趋势($P=0.342$),而在后一时段,存在不显著的

表 2　1910—2016 年哈萨克斯坦阿尔泰山南坡落叶松与云杉年表序列的 10 个最高/最低值

Tab. 2　Ten highest/lowest values of tree-ring chronologic sequences of *Larix sibirica* and *Picea sibirica* in the Altay Mountains in Kazakhstan during the period from 1910 to 2016

落叶松				云杉			
10 个最高值		10 个最低值		10 个最高值		10 个最低值	
年份	宽度指数	年份	宽度指数	年份	宽度指数	年份	宽度指数
1979	1.856	1940	0.354	1978	1.363	1916	0.415
1978	1.568	1941	0.487	1979	1.339	1912	0.476
1976	1.451	2009	0.579	1932	1.324	1915	0.552
1980	1.409	1949	0.583	2007	1.290	1999	0.621
1935	1.382	1997	0.614	1946	1.267	1917	0.637
1937	1.348	1960	0.619	1976	1.250	1913	0.657
1968	1.312	2015	0.650	1935	1.243	1918	0.667
1993	1.276	1920	0.672	1981	1.243	1914	0.677
1922	1.270	1948	0.675	1960	1.217	2016	0.696
1977	1.254	1939	0.691	1956	1.195	1998	0.698

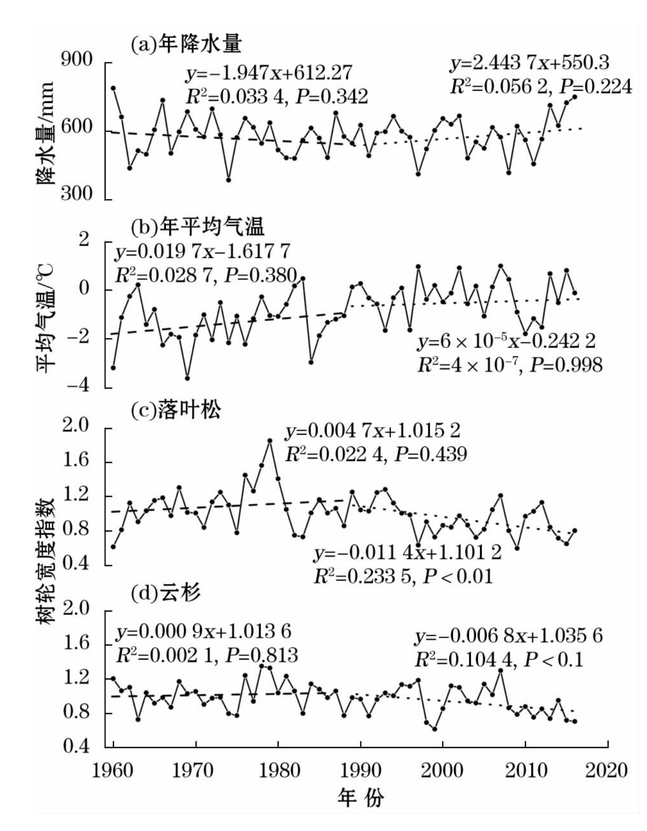


图 5　1960—2016 年时段内 1988 年前后年气候资料及 2 个树种年轮指数变化趋势

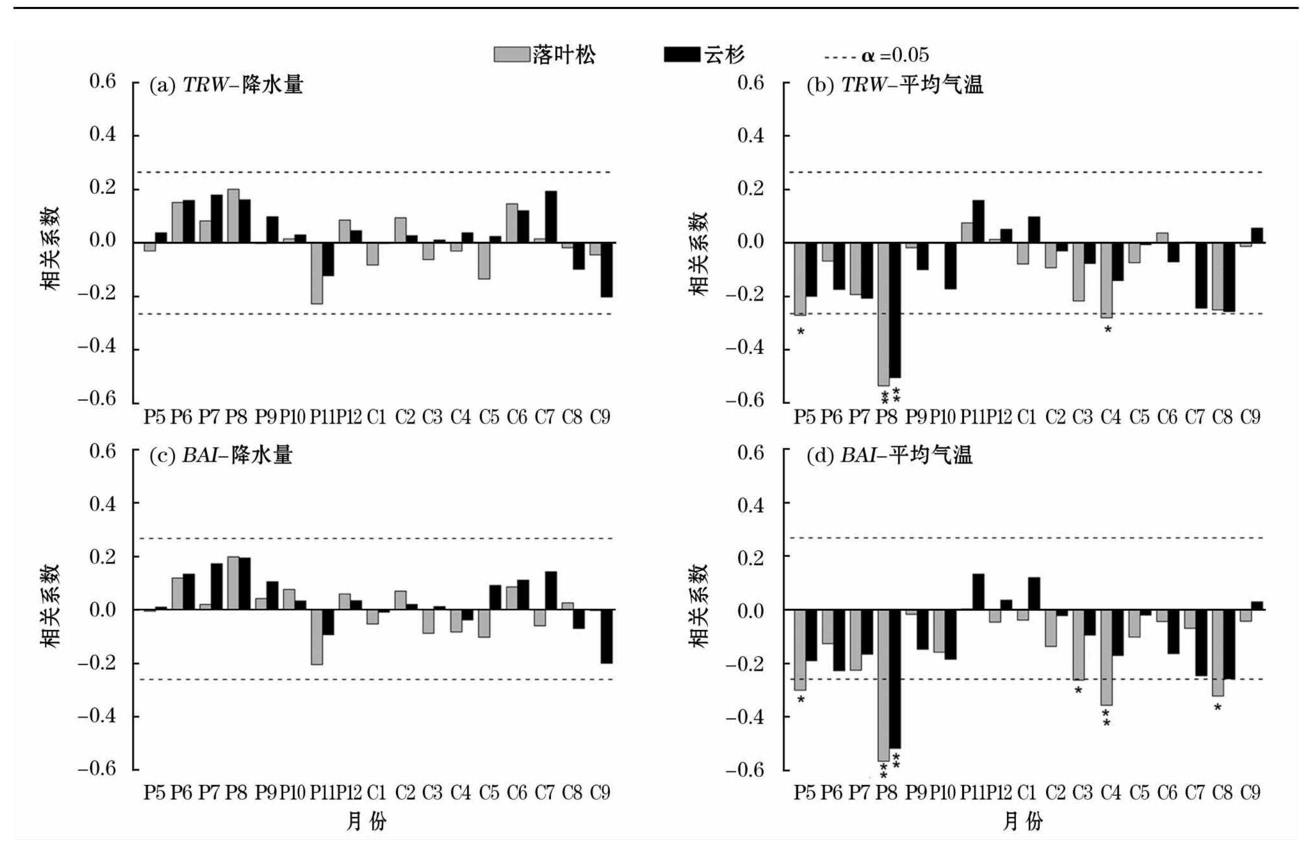
Fig. 5　The trend analysis of annual climatic data and tree-ring width indexes of *Picea sibirica* and *Larix sibirica* before and after temperature mutation

增加趋势(P=0.224);年平均气温在前后 2 个时段均存在不显著的增加趋势(P = 0.380 和 P = 0.998)。从树轮宽度指数曲线来看,前一时段的落叶松树轮宽度指数线性趋势方程为 $y = 0.0047x + 1.0152$(R^2 = 0.0224, P = 0.439),而云杉树轮宽度指数线性趋势方程为 $y = 0.0009x + 1.0136$(R^2 = 0.0021, P = 0.813);后一时段的落叶松树轮宽度指数的线性趋势方程为 $y = -0.0114x + 1.1012$(R^2 = 0.2335, $P < 0.01$),云杉树轮宽度指数的线性趋势方程为 $y = -0.0068x + 1.0356$(R^2 = 0.1044, $P < 0.1$)。以上结果表明,在气温突变前,云杉和落叶松的树轮宽度指数均存在不显著增加趋势,而在气温突变后,2 个树种树轮宽度指数均发生了显著下降趋势(云杉年轮宽度指数的显著下降趋势较弱),其树轮生长均出现了分异现象。且在气温突变后云杉树轮宽度指数下降趋势达到的显著性水平较弱($P < 0.1$),这也说明落叶松对气候因子的敏感性强于云杉。

2.2　不同树种对气候因子的响应

使用 Pearson 相关分析法分别检验落叶松和云杉在 1960—2016 年树轮宽度指数和 *BAI* 指数与上一年 5 月至当年 9 月逐月气候资料间的相关关系。

由图 6 可知,2 个树种的树木生长与气温相关性较强,而与降水则未发现显著性相关。从分析结果来看,2 个树种树轮宽度指数和 *BAI* 指数与上一年 5 月至当年 9 月的月平均气温总体上呈负相关关系。云杉树轮宽度指数和 *BAI* 指数与上一年 8 月平均气温均存在显著负相关(r = −0.504, $P < 0.01$ 和 r = −0.518, $P < 0.01$);落叶松树轮宽度指数与上一年 5 月(r = −0.271, $P < 0.05$)、上一年 8 月(r = −0.534, $P < 0.01$)和当年 4 月(r = −0.28, $P < 0.05$)的平均气温存在显著负相关;落叶松 *BAI*



注：*TRW* 代表树轮宽度指数，*BAI* 代表断面积生长量指数。下同。

图 6　树轮年表与气象资料的相关分析结果

Fig. 6　Correlations between the tree-ring chronologies and the meteorological data

指数除与上一年 5 月($r=-0.301$, $P<0.05$)、上一年 8 月($r=-0.566$, $P<0.01$)和当年 4 月($r=-0.357$, $P<0.01$)的平均气温存在显著负相关外，与当年 3 月($r=-0.263$, $P<0.05$)和当年 8 月($r=-0.323$, $P<0.05$)的平均气温也存在显著负相关。且在上一年 8 月，落叶松树轮宽度指数和 *BAI* 指数与上一年 8 月平均气温的负相关系数低于云杉。以上结果说明，落叶松可能包含了较多的气候信息，落叶松对气温的负响应强于云杉对气温的负响应，也说明树轮宽度指数和气候资料的 Pearson 相关分析结果与 *BAI* 指数和气候资料的 Pearson 相关分析结果相类似。

2.3　气温突变前后树木径向生长的响应变化

在气温突变点 1988 年前后分为 2 个时段 1960—1988 年和 1989—2016 年，分别开展云杉和落叶松树轮宽度指数和 *BAI* 指数的树轮学指标信息与气候因子的相关分析。由图 7 得知，在 1960—1988 年，研究区当年 7 月降水量与云杉树轮宽度年表有一个达到显著性水平的正相关($r=0.368$, $P<0.05$)，与 *BAI* 年表也有一个接近显著性水平的正相关($r=0.345$)；但在 1989—2016 年，2 个年表与当年 7 月降水量的正相关均没有达到显著性水平，且在 1989—2016 年，2 个年表与上一年 5 月、9 月、当年 1 月和 5 月降水量的相关性均由原来的负相关变为正相关，与上一年 12 月、当年 3 月、4 月和 6 月降水量的相关性均由原来的正相关变为负相关。另外，在 1960—1988 年，云杉树轮宽度年表和 *BAI* 年表与上一年 8 月平均气温均存在显著负相关($r=-0.506$, $P<0.01$ 和 $r=-0.526$, $P<0.01$)；在 1989—2016 年，2 个年表与上一年 8 月的显著负相关依然存在($r=-0.401$, $P<0.05$ 和 $r=-0.426$, $P<0.05$)，且又增加了一个与上一年 10 月平均气温的显著负相关($r=-0.459$, $P<0.05$ 和 $r=-0.405$, $P<0.05$)。此外，2 个年表在 1989—2016 年与气温的相关关系总体来看是正相关性减弱，负相关性加强或由正相关关系转为负相关关系。以上结果说明，研究区气温发生突变后云杉对降水的响应变弱，对气温的响应有所增强。

在 1960—1988 年，落叶松树轮宽度年表和 *BAI* 年表与当年 5 月的降水量均存在显著负相关($r=-0.386$, $P<0.05$ 和 $r=-0.420$, $P<0.05$)；但在 1989—2016 年，这一相关系数均变为正值，且在

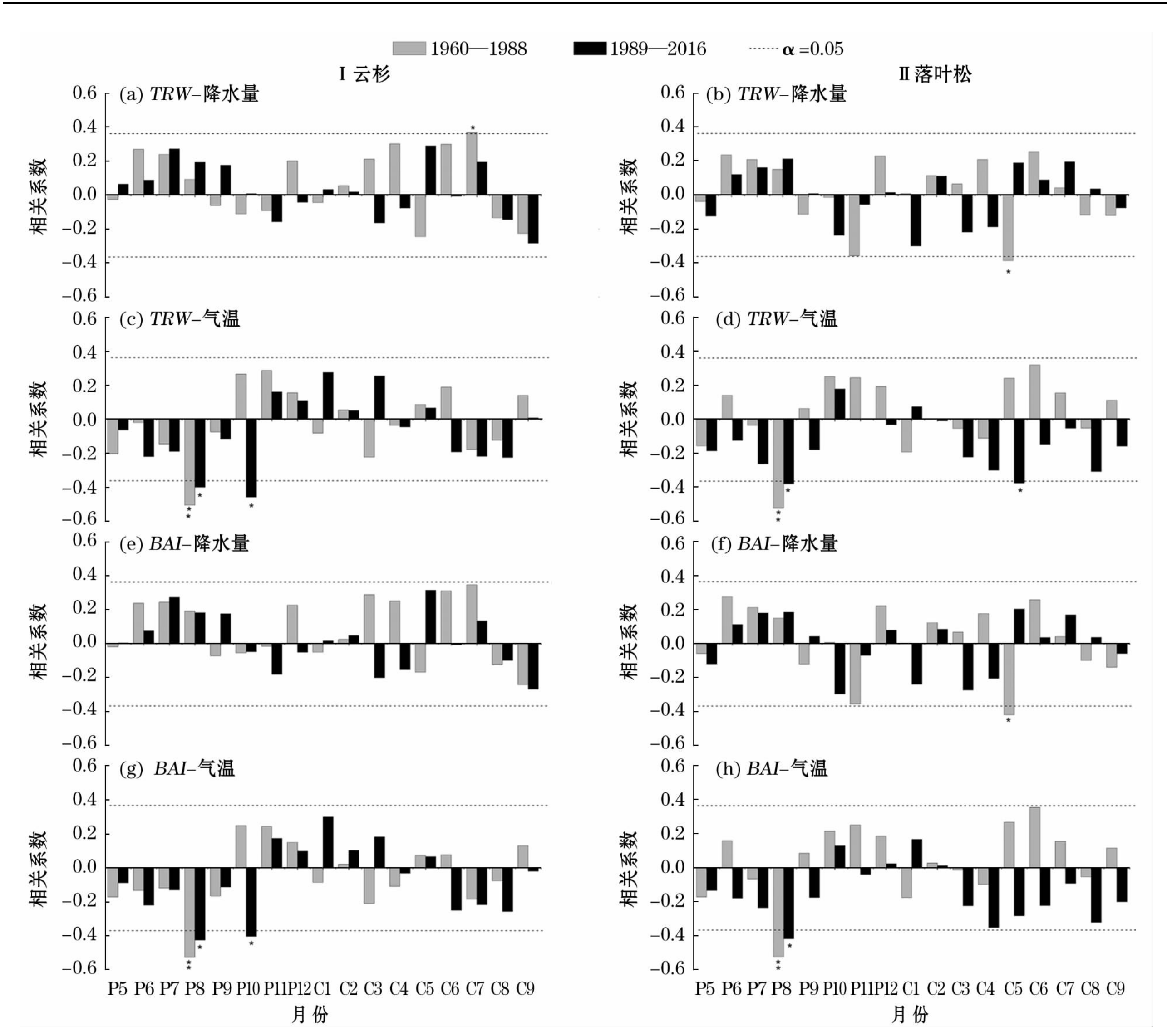


图7　升温突变前后树轮年表与月气候要素的相关分析

Fig. 7　Correlation between the tree-ring chronologies and climate data before and after warming abrupt change

1989—2016 年,2 个年表与上一年 9 月、当年 5 月和 8 月降水量的相关性均由原来的负相关变为正相关,与当年 1 月、3 月和 4 月降水量的相关性均由原来的正相关变为负相关。另外,在 1960—1988 年,2 个年表与上一年 8 月平均气温均存在显著负相关($r = -0.524, P < 0.01$ 和 $r = -0.523, P < 0.01$),与当年 5—7 月的平均气温存在不显著的正相关;在 1989—2016 年,2 个年表与上一年 8 月平均气温的显著负相关依然存在($r = -0.381, P < 0.05$ 和 $r = -0.418, P < 0.05$),但与当年 5—7 月平均气温的相关性由正相关变为负相关。且在后一时段内 2 个年表与平均气温的相关关系总体来看呈现出正相关性减弱,负相关性加强或由正相关关系转为负相关关系的现象。以上结果表明,在气温发生突变后,落叶松径向生长对降水的敏感性变弱,对气温的敏感性有所增强;也说明树轮宽度指数和气候资料的 Pearson 相关分析结果与 *BAI* 指数相类似。

分别计算落叶松和云杉 1960—1988 年和 1989—2016 年的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与研究区上一年 5 月到今年 9 月逐月降水量和平均气温相关系数的 u 值(表 3)。结果表明,云杉 2 个时期的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与上一年 10 月平均气温的相关系数的 u 值分别为 2.68($P < 0.05$)和 2.39($P < 0.05$),与降水的 u 值均未达到 0.05 的显著性水平。落叶松 2 个时段的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与 5 月降水和平均气温的相关系数的 u 值均达到 0.05 的显著性水平;其树轮宽度年表与 6 月平均气温的相关系数的 u 值为 1.72,接近 0.05 的显著性水平,其 *BAI* 年表与 6 月平均气温的相关系数的 u 值为 2.13($P < 0.05$)。说明云杉 2 个时期的树轮宽

表 3 升温突变前后 2 个标准年表与气候资料相关系数差异性 u 检验结果

Tab. 3 Differences of correlation coefficients between two standardized tree-ring chronologies and climatic data before and after warming abrupt change assessed by u-test results

	落叶松 *TRW* – 降水量	落叶松 *TRW* – 均温	云杉 *TRW* – 降水量	云杉 *TRW* – 均温	落叶松 *BAI* – 降水量	落叶松 *BAI* – 均温	云杉 *BAI* – 降水量	云杉 *BAI* – 均温
P5	0.30	0.10	-0.32	-0.50	0.22	-0.14	-0.08	-0.30
P6	0.42	0.93	0.66	0.71	0.60	1.19	0.59	0.31
P7	0.17	0.81	-0.12	0.16	0.12	0.61	-0.10	0.04
P8	-0.23	-0.63	-0.36	-0.46	-0.13	-0.47	0.04	-0.45
P9	-0.43	0.85	-0.83	0.14	-0.58	0.92	-0.87	-0.19
P10	0.79	0.26	-0.41	2.68*	1.09	0.31	-0.02	2.39*
P11	-1.13	0.89	0.24	0.47	-1.07	1.06	0.60	0.26
P12	0.78	0.81	0.88	0.17	0.52	0.59	1.00	0.19
C1	1.13	-0.96	-0.28	-1.30	0.87	-1.24	-0.24	-1.42
C2	0.01	0.04	0.13	0.01	0.14	0.05	-0.09	-0.29
C3	1.02	0.62	1.35	-1.74	1.24	0.77	1.79	-1.42
C4	1.44	0.71	1.39	0.03	1.38	0.97	1.47	-0.28
C5	-2.13*	2.29*	-1.95	0.08	-2.33*	2.02*	-1.77	0.03
C6	0.60	1.72	1.12	1.38	0.81	2.13*	1.18	1.19
C7	-0.56	0.75	0.68	0.15	-0.46	0.89	0.81	0.12
C8	-0.55	0.95	0.04	0.38	-0.49	1.00	-0.09	0.67
C9	-0.16	0.97	0.22	0.47	-0.29	1.14	0.10	0.54

注：* 表示通过 $P < 0.05$ 显著性检验。

度年表和 *BAI* 年表与上一年 10 月平均气温的相关系数有显著差异，与降水的相关系数均无显著差异；落叶松 2 个时段的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与 5 月降水和平均气温的相关系数均有显著差异，其 *BAI* 年表与 6 月平均气温的相关系数也有显著差异，树轮宽度年表虽与 6 月平均气温的相关系数无显著差异，但也接近达到显著差异水平。以上结果也说明，利用树轮宽度年表和 *BAI* 年表分别与气候资料做 u 检验时，其计算结果相类似。

3 讨论与结论

哈萨克斯坦阿尔泰山南部西伯利亚落叶松和西伯利亚云杉标准化树轮宽度年表之间具有较好的相关性，其低频变化的一致性较高；2 个年表 GLK 值达到了 0.01 的显著性水平，说明 2 个树种的树木生长状况相似，树木生长的气候限制因子可能相似。落叶松的平均敏感度、标准方差、信噪比等年表特征值均略高于云杉，表明落叶松可能包含较多的气候信息。研究区落叶松和云杉在幼龄林阶段生长速度较快，在中龄林至成熟林阶段比在幼龄林阶段的生长速度有所减缓。这可能与树间竞争[25-26]以及近年来全球气候变暖有关，也可能是由于该时段树木处于稳定生长阶段，树木径向生长速率比之幼龄期有所减缓。在全球气候变暖背景下[1]，云杉和落叶松径向生长主要受气温的限制，降水的影响相对较小，其中落叶松对气温的响应略强于云杉。但总体来看，2 个树种树木径向生长对气候的响应无显著差异。相关分析（图 6 和图 7）的结果显示，*BAI* 指数和气候资料的 Pearson 相关分析结果与树轮宽度指数和气候资料的 Pearson 相关分析结果相似，且利用树轮宽度年表和 *BAI* 年表分别与气候资料做 u 检验时，其计算结果也相似。原因可能是本文对靠近髓芯部分缺失的树轮是根据树轮的弦长和弓高进行近似估计的[19]，且 *BAI* 值也是依据原始树轮宽度指数计算的。因此，虽然 *BAI* 指数反映树轮全轮的生长，宽度指数仅反映树轮半径的生长，但其结果相类似。

落叶松和云杉的树轮宽度指数及 *BAI* 指数在升温突变前后与气候因子的相关分析（图 7）结果表明，升温突变后，落叶松和云杉树木径向生长对降水的响应变弱，对气温的响应有所增强，并且发生了树轮宽度指数和 *BAI* 指数与气候因子间相关性“正负转换”的情况。2 个树种树木径向生长对降水响应有所减弱，对气温响应有所增强，可能是由于近几十年内，研究区年降水量虽有缓慢增加，但其年平均气温增加趋势更加显著（图 4）。而较高的气温使得研

究区森林下线土壤及空气中的水分蒸发量加大,植物蒸腾作用增大,从而加强了气温对树木生长的限制作用,导致树木径向生长减缓。这与川西高原快速升温后,各月气温对西北坡紫果云杉径向生长出现显著抑制的研究结果[27]一致。升温突变后,落叶松和云杉树轮宽度指数及 *BAI* 指数与气候因子间的相关性发生了“正负转换”的现象,这与树木径向生长对原有的主要气候限制因子的敏感性发生了明显减弱或增强,甚至对气候因子的相关性发生了“由正转负”或“由负转正”的情况时,被称之为“分异问题”的研究结果[28]相似。*u* 检验结果表明(表 3),云杉 2 个时期的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与上一年 10 月平均气温的相关系数有显著差异;落叶松 2 个时段的树轮宽度年表和 *BAI* 年表与 5 月降水和平均气温的相关系数均有显著差异。这也说明 2 个树种在升温突变后可能发生了“分异问题”。此外,云杉和落叶松树轮宽度指数分析结果表明(图 5),在升温突变前后 2 个树种树轮宽度指数变化趋势一致。但在升温突变后其变化趋势均由不显著增加趋势转为显著下降趋势(云杉显著下降趋势较弱,$P < 0.1$)。这说明落叶松对气候因子的敏感性强于云杉,也说明在升温突变后,气候的变化对树木的生长产生了不利影响,2 个树种可能出现了生长分异现象。原因可能是干旱半干旱地区升温突变后,耐寒耐干的西伯利亚落叶松[29]生长季节呼吸作用加强,过度消耗体内积累的养分,从而对下一年树木生长产生不利影响;西伯利亚云杉是喜湿树种[13],对土壤湿度非常敏感,土壤干旱胁迫会降低树木叶水势,从而降低树木的光合作用,影响树木的生长[30],生长季温度过高也容易加快水分蒸发,植物蒸腾,并提高蒸气差,从而影响树木的生长。春季正处于树木生长季早期,树木对水分的需求较大,但同时期温度过高使得水分蒸发量增大,树木蒸腾作用加剧,树木生长所需水分散失严重,生长胁迫加剧[5],从而限制了树木的生理代谢活动,使得云杉和落叶松树轮宽度指数在升温突变后出现了显著下降趋势;又由于上一年生长季及生长季末期高温胁迫加剧,使得土壤含水量较少,降水量不能满足其生长需求时,树木第二年生长的速率减缓,树木径向生长与上一年生长季及生长季末期温度的关系表现为显著负相关。张艳静等[31]对乌苏地区雪岭云杉的研究表明,树木径向生长随气温升高反而出现了下降趋势;尹红等[32]在小兴安岭红松的研究中表明,生长季气温升高会使树木生长量相对降低;郭明明等[6]对高、中海拔岷江冷杉的研究中也表明,随着气温的升高树木径向生长反而出现了下降趋势的结果。而在本研究中,发生升温突变后,落叶松和云杉树轮宽度指数均出现了显著下降趋势,2 个树种径向生长也都发生了对降水的敏感性减弱,对气温的敏感性有所增强的情况。这说明全球气候变暖不利于研究区落叶松和云杉树木生长,使得 2 个树种在升温突变后,可能出现了生长分异现象(即落叶松和云杉径向生长减缓),其径向生长对气候因子的响应也可能发生了分异。这一结果与白学平等[33]对近 30 a 快速升温导致内蒙古大兴安岭北部山坡上兴安落叶松径向生长减慢的研究结果相似。

本研究是基于哈萨克斯坦阿尔泰山南坡森林下线 2 个采样点,共计 21 棵西伯利亚落叶松和 20 棵西伯利亚云杉树轮样本的研究结果。未来计划扩大采样范围,增加样本量,以期获得更为可靠的研究结果,从而对今后在这一地区开展的树轮样本采集工作和基于树轮资料的历史气候重建研究提供意见和建议。

参考文献(References):

[1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 刘世荣,郭泉水,王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报,1998,18(5):478 – 483. [Liu Shirong, Guo Quanshui, Wang Bing. Prediction of net primary productivity of forests in China in response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 478 – 483.]

[3] D'Arrigo R D, Kaufmann R K, Davi N, et al. Thresholds for warming-induced growth decline at elevational tree line in the Yukon Territory, Canada[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(3): GB3021.

[4] 方克艳,陈秋艳,刘昶智,等. 树木年代学的研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1 879 – 1 888. [Fang Keyan, Chen Qiuyan, Liu Changzhi, et al. Research advances in dendrochronology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1 879 – 1 888.]

[5] Buntgen U, Frank D C, Schmidhalter M, et al. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology[J]. Trees Structure and Function, 2006, 1: 99 – 110.

[6] 郭明明,张远东,王晓春,等. 升温突变对川西马尔康树木生长的影响[J]. 生态学报,2015,35(22):7 464 – 7 474. [Guo Mingming, Zhang Yuandong, Wang Xiaochun, et al. Effects of abrupt warming on main conifer tree rings in Markang, Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7 464 – 7 474.]

〔7〕 苟晓霞,叶茂,汪亮亮,等. 塔里木河上游河岸胡杨径向生长对温度的敏感性〔J〕. 干旱区研究,2018,35(4):899 – 904.〔Gou Xiaoxia, Ye Mao, Wang Liangliang, et al. Sensitivity of radial growth of *Populus euphratica* to temperature in the upper reaches of the Tarim River〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(4):899 – 904.〕

〔8〕 齐元元,尚华明,张瑞波,等. 利用树轮重建玛纳斯河流域过去289 a 降水变化〔J〕. 干旱区研究,2017,34(4):942 – 949.〔Qi Yuanyuan, Shang Huaming, Zhang Ruibo, et al. The 289-year variation of precipitation reconstructed with tree-ring data in the Manas River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(4):942 – 949.〕

〔9〕 尚华明,魏文寿,袁玉江,等. 树轮记录的中天山 150 年降水变化特征〔J〕. 干旱区研究,2010,27(3):443 – 449.〔Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. The 150 – year precipitation change recorded by tree ring in the Central Tianshan Mountains〔J〕. Arid Zone Research,2010,27(3):443 – 449.〕

〔10〕 何清,袁玉江,赵勇,等. 中亚气候变化调查研究〔M〕. 北京:气象出版社,2015:137 – 138.〔He Qing, Yuan Yujiang, Zhao Yong, et al. Investigation on Climate Change in Central Asia〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2015:137 – 138.〕

〔11〕 Myglana V S, Oidupaab O C, Kirdyanovc A V, et al. 1929 – year chronology for the Altai-Sanyan Region (Western Tuva)〔J〕. Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia,2008,36(4):25 – 31.

〔12〕 张同文,袁玉江,喻树龙,等. 用树木年轮重建阿勒泰西部 5—9 月 365 年来的月平均气温序列〔J〕. 干旱区研究,2008,25(2):288 – 294.〔Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. The 365-year of mean may-september temperature reconstructed with tree-ring data in West Altay, Xinjiang of China〔J〕. Arid Zone Research,2008,25(2):288 – 294.〕

〔13〕 姜盛夏,袁玉江,喻树龙,等. 额尔齐斯河上游西伯利亚云杉树轮宽度年表特征分析及其对气候的响应〔J〕. 沙漠与绿洲气象,2015,9(2):16 – 23.〔Jiang Shengxia, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Analyses of tree-ring width chronologies of *Picea obovata* Ledeb in the upper stream section of the Irtysh River and tree-growth response to climate〔J〕. Desert and Oasis Meteorology, 2015,9(2):16 – 23.〕

〔14〕 尚华明,魏文寿,袁玉江,等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应〔J〕. 生态学报,2010,30(9):2 246 – 2 253.〔Shang Huaming, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altai Mountains〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2010,30(9):2 246 – 2 253.〕

〔15〕 Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating〔M〕. Tucson:University of Arizona Press,1996:1 – 173.

〔16〕 Homes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement〔J〕. Tree ring Bulletin,1983,43:69 – 78.

〔17〕 Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization〔D〕. Tucson:The University of Arizona Press,1985.

〔18〕 Jiao L, Jiang Y, Wang M C, et al. Responses to climate change in radial growth of Piceaschrenkiana along elevations of the Eastern Tianshan Mountains, Northwest China〔J〕. Dendrochronologia,2016,40:117 – 127.

〔19〕 Rozas V. A dendroecological reconstruction of age structure and past management, in an old-growth pollarded parkland in Northern Spain〔J〕. Forest Ecology and Management,2004,195(1/2):205 – 219.

〔20〕 于健,罗春旺,徐倩倩,等. 长白山原始林红松径向生长及林分碳汇潜力〔J〕. 生态学报,2016,36(9):2 626 – 2 636.〔Yu Jian, Luo Chunwang, Xu Qianqian, et al. Radial growth of *Pinus koraiensis* and carbon sequastration potential of the old growth forest in Changbai Mountain, Northeast China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(9):2 626 – 2 636.〕

〔21〕 Schweingruber F H, Briffa K R, Nogler P. A tree-ring densitometric transect from Alaska to Labrador〔J〕. International Journal of Biometeorology,1993,37(3):151 – 169.

〔22〕 Wang H, Shao X M, Jiang Y, et al. The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus oraiensis* along elevations of Changbai Mountain in Northeastern China〔J〕. Forest Ecology and Management,2013,289:333 – 340.

〔23〕 Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3. 10 Dataset〔J〕. International Journal of Climatology,2014,34:623 – 642.

〔24〕 Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, He Qing, et al. Development of tree-ring width chronologies and tree-growth response to climate in the mountains surrounding the Issyk-Kul Lake, Central Asia〔J〕. Dendrochronologia,2014,32(3):230 – 236.

〔25〕 李晓青,刘贤德,王立,等. 祁连山青海云杉直径结构及其对径向生长的影响〔J〕. 干旱区研究,2017,34(5):1 117 – 1 123.〔Li Xiaoqing, Liu Xiande, Wang Li, et al. Diameter structure and its effect on radial growth of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(5):1 117 – 1 123.〕

〔26〕 雷泽勇,周晏平,赵国军,等. 竞争对辽宁西北部樟子松人工固沙林树高生长的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):144 – 149.〔Lei Zeyong, Zhou Yanping, Zhao Guojun, et al. Effects of competition on tree height growth of sand-fixation plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Northwest Liaoning Province〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(1):144 – 149.〕

〔27〕 郭滨德,张远东,王晓春. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异〔J〕. 应用生态学报,2016,27(2):354 – 364.〔Guo Binde, Zhang Yuandong, Wang Xiaochun. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slope aspects to rapid warming in Western Sichuan, China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(2):354 – 364.〕

〔28〕 Wilmking M, Myers-Smith I. Changing climate sensitivity of black spruce (*Picea mariana* Mill.) in a peatland-forest landscape in Interior Alaska〔J〕. Dendrochronologia,2008,25(3):167 – 175.

〔29〕 曹仪植,宋占午. 植物生理学〔M〕. 兰州:兰州大学出版社,1998:375 – 383.〔Cao Yizhi, Song Zhanwu. Plant Physiology〔M〕. Lanzhou:University of Lanzhou Press,1998:375 – 383.〕

〔30〕 郭建平,高素华. CO_2 浓度和辐射强度变化对沙柳光合作用速率影响的模拟研究〔J〕. 生态学报,2004,24(2):181 – 185.〔Guo Jianping, Gao Suhua. Growth chamber study on the impact of CO_2 concentration and radiant intensity on *Salix psammophila* photosynthetic rate〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2004,24(2):181 – 185.〕

〔31〕 张艳静,郑宏伟,于瑞德,等. 天山中西段不同地区雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异〔J〕. 植物研究,2017,37(3):340 – 350.〔Zhang Yanjing, Zheng Hongwei, Yu Ruide, et al. Response differences of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in Midwestern Tianshan Mountains〔J〕. Bulletin of Botan-

ical Research,2017,37(3):340－350.〕

〔32〕尹红,王靖,刘洪滨,等.小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应〔J〕.生态学报,2011,31(24):7 343－7 350.〔Yin Hong,Wang Jing,Liu Hongbin,et al. A research on the response of the radial growth of *Pinus koraiensis* to future climate change in the Xiaoxing' anling〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2011,31(24):7 343－7 350.〕

〔33〕白学平,常永兴,张先亮,等.近30年快速升温对两种典型小地形上兴安落叶松径向生长的影响〔J〕.应用生态学报,2016,27(12):3 853－3 861.〔Bai Xueping,Chang Yongxing,Zhang Xianliang,et al. Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmeliniion* two typical micro-topographies in the recent 30 years〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(12):3 853－3 861.〕

Radial Growth of Trees in Response to Climatic Factors in the Altay Mountains, South of Kazakhstan

LIU Rui[1,2,3], WANG Yong-hui[1], JIANG Sheng-xia[2,3], ZHANG Rui-bo[2,3], QIN Li[2,3], Bulkajyr T. Mambetov[4], Nurzhan Kelgenbayev[4], Daniyar Dosmanbetov[4], Bagila Maisupova[4], ZHANG Tong-wen[2,3]

(1. *College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi* 830054, *Xinjiang, China*;
2. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*;
3. *Key Laboratory of Tree-ring Physicochemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi* 830002, *Xinjiang, China*;
4. *Almaty Institute of Forestry, Kazakhstan Ministry of Agriculture, Alma-Ata* 050050, *Kazakhstan*)

Abstract: The response of the radial growth of two tree species to climatic factors before and after a sudden rise of regional temperature in 1988 was analyzed based on the research of *Picea obovata* and *Larix sibirica* on the southern slope of the Altay Mountains in Kazakhstan. The results showed that there was a good correlation between the two standardized chronologies of the two tree species, and also a high consistency with the stage of low-frequency change and a high reliability of chronological series change. The GLK values of the two chronologies were high, which indicated that their radial growth was consistent. The radial growth of *P. obovata* and *L. sibirica* was faster at their young forest age but slower from the middle forest age to the mature forest age in the study area. The variation trend of tree-ring width index of these two tree species was consistent before and after the sudden rise of temperature. Before the sudden rise of temperature, the tree-ring width index of these two tree species increased unsignificantly with a slow decrease of precipitation and a slow increase of temperature. However, after the sudden rise of temperature, the tree-ring width index of *P. obovata* and *L. sibirica* was in a significant decline trend with the slow increase of annual precipitation and annual average temperature. This showed that there was a negative impact of climate change on the growth of trees, and the growth of these two tree species might be slowed down after the sudden rise of temperature. Under global warming, the radial growth of *P. obovata* and *L. sibirica* was mainly restricted by temperature, and the influence of precipitation was relatively low. The response of *L. sibirica* to temperature was slightly stronger than that of *P. obovata*. Holistically, there was a unsignificant difference in response of the radial growth of these two tree species to climate change. The response of the growth of these two tree species to climatic factors before and after the sudden rise of regional temperature in 1988 was analyzed. The results showed that, during the period from 1960 and 1988, there was a significant negative response of tree-ring width of *L. sibirica* to the precipitation in May that year, and to the temperature in August last year. There was a significant positive correlation between the radial growth of *P. obovata* and the precipitation in July of that year, but a significant negative correlation between it and the temperature in August last year. During the period from 1989 to 2016, the response of *L. sibirica* to the precipitation in May was no longer significant. Instead, there was a significant negative correlation between the growth of *L. sibirica* and the temperature in May of that year and in August last year. There was a weaker positive correlation and a higher negative correlation between the growth of this tree species and the temperature in growth season, or a change from positive correlation to negative correlation. The significant correlation between the radial growth of *P. obovata* and the precipitation disappeared. Instead, a negative correlation with temperature strengened, especially in August and October last year. The results showed that the positive response of the tree-ring width of *P. obovata* and *L. sibirica* to precipitation decreased but the negative response to temperature increased after the sudden rise of temperature. The response of the radial growth of *P. obovata* and *L. sibirica* to climatic factors might different after the sudden rise of temperature.

Key words: Altay Mountains; *Picea obovata*; *Larix sibirica*; tree-ring width; radial growth; divergence response; Kazakhstan